

EFFETTI DELLA PRESENZA DI CAVITÀ SULLA RISPOSTA SISMICA IN SUPERFICIE

Luca Verrucci, Giuseppe Lanzo

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica – Sapienza Università di Roma
luca.verrucci@uniroma1.it, giuseppe.lanzo@uniroma1.it

Alessandro Pagliaroli

Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - CNR
alessandro.pagliaroli@igag.cnr.it

Sommario

Nell'ambito degli studi di risposta sismica locale, l'influenza di cavità sotterranee sul moto sismico è attualmente oggetto di un crescente interesse nella comunità scientifica. Per indagare tale aspetto è stato sviluppato un modello bidimensionale costituito da una singola cavità a sezione circolare in un mezzo lineare elastico investito da un fronte d'onda piano. Dopo una coerente scelta delle grandezze variabili, che includono la dimensione della cavità, la sua profondità, la lunghezza d'onda del moto incidente e l'angolo di incidenza del fronte, è stato eseguito un insieme di analisi numeriche parametriche con il codice alle differenze finite FLAC. I primi risultati sono forniti sotto forma di diagrammi del fattore di amplificazione del moto rispetto alla condizione di campo libero, espresso, per ciascuna componente, in funzione di variabili normalizzate.

Introduzione

L'influenza della presenza di una cavità sulla risposta superficiale a seguito dell'incidenza di un'onda meccanica è un problema studiato sia nell'ambito dell'ingegneria sismica, per indagare la modifica del campo d'onda nelle vicinanze di cavità sotterranee, che nella dinamica dei materiali, ad es. per lo studio dell'utilizzo di tecniche di indagine non distruttive. Numerosi studi analitici sono stati condotti fin dagli anni '70 del secolo scorso per indagare l'effetto delle cavità su un fronte d'onda incidente di tipo SH (e.g., Lee, 1977; Lee e Trifunac, 1979; Smerzini et al., 2009) o di tipo P e SV (e.g., Wong et al. 1985; Lee e Karl 1992 e 1993). Nel primo caso, poiché le riflessioni avvengono senza fenomeni di *mode-conversion*, il problema matematico è decisamente più semplice rispetto al caso di onde P e SV per il quale è necessario introdurre alcune ipotesi semplificative, generalmente riguardanti la forma della superficie limite del semispazio ospitante la cavità. A tal riguardo Davis et al. (2001) hanno mostrato come la soluzione analitica sia tuttavia suscettibile al tipo di approssimazione adottata.

Più recentemente il problema è stato affrontato prevalentemente per via numerica. In particolare le analisi parametriche di Sanò (2011), eseguite con il metodo degli elementi al contorno, hanno evidenziato l'effetto di attenuazione della risposta in superficie all'aumentare della profondità e l'importanza del rapporto tra lunghezza d'onda e dimensioni della cavità.

Al fine di indagare l'influenza delle cavità sui danni prodotti nell'abitato di Castelnuovo (AQ) durante il terremoto dell'Aquila del 2009, Landolfi et al. (2011) hanno studiato numericamente il caso di una cavità circolare inclusa in un deposito limoso con modello costitutivo visco-elastico, investita da un'onda verticale di tipo SV. I fattori di amplificazione, espressi in termini di accelerazione di picco o di Intensità di Housner mostrano l'effetto

deamplificante al di sopra del tetto della cavità. L'attenuazione aumenta al crescere delle dimensioni della cavità ed al diminuire della sua profondità.

Sebbene i lavori citati, sia analitici che numerici, abbiano messo in luce i fattori chiave nella risposta dinamica di una cavità, è sembrato opportuno eseguire una serie di analisi numeriche di tipo parametrico che coprissero in maniera sistematica l'intero dominio di interesse applicativo. A tal fine il fenomeno da studiare è stato semplificato al caso di una singola cavità cilindrica a sezione circolare, inclusa in un semispazio elastico interessato da un fronte d'onda piano di tipo P o SV (Fig.1).

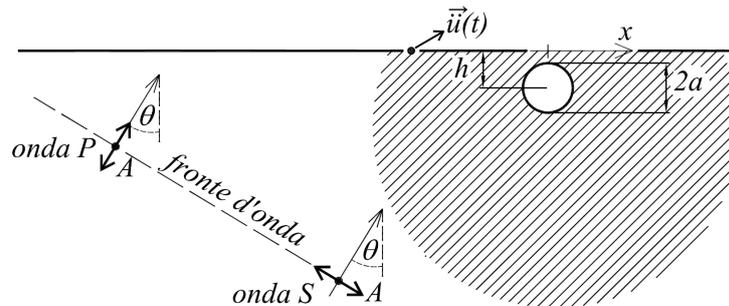


Figura 1. Schema del modello piano adottato

Tabella 1. Variabili che descrivono il fenomeno

Variabile		Dimensioni
θ	Angolo di incidenza	-
f	Frequenza dell'onda incidente	T^{-1}
ρ	Densità del mezzo elastico	MT^{-3}
V_S	Velocità delle onde di taglio nel mezzo elastico	LT^{-1}
ν	Coefficiente di Poisson del mezzo elastico	-
x	Coordinata orizzontale sulla superficie del semispazio	L
t	Tempo	T
a	Raggio della cavità	L
H	Profondità del centro della cavità	L
\ddot{u}	Accelerazione sulla superficie (compon. orizzontale o verticale)	LT^{-2}
A	Ampiezza dell'accelerazione del moto incidente	LT^{-2}

Selezione dei parametri che controllano la risposta dinamica di una cavità

Un insieme completo delle $n = 11$ variabili con le quali è possibile descrivere il fenomeno, e delle relative dimensioni, è riportato nella Tabella 1. Un'analisi dimensionale preliminare permette di esprimere il fenomeno con una relazione tra $m = n - k = 8$ variabili adimensionali, in cui $k = 3$ è il numero di dimensioni coinvolte (massa, lunghezza e tempo). Una possibile scelta è espressa dalla seguente relazione:

$$\Pi(\xi, \zeta, \tau, \eta, \theta, \nu, \nu_1, \nu_2) = 0 \quad (1)$$

$$\text{in cui } \xi = \frac{x}{a}, \zeta = \frac{h}{a}, \tau = t \cdot f, \eta = \frac{2a}{\lambda} = \frac{\omega \cdot a}{\pi V_S}, \nu_1 = \frac{\ddot{u}}{a \cdot f^2}, \nu_2 = \frac{A}{a \cdot f^2}.$$

Il numero di fattori adimensionali può essere ridotto ulteriormente assumendo l'ipotesi di poter trascurare la modesta variabilità del coefficiente di Poisson. Non essendo interessati all'ampiezza assoluta del moto, ma solo agli effetti di amplificazione, le due ampiezze normalizzate ν_1 e ν_2 possono essere sostituite dal rapporto di amplificazione $H = \nu_1 / \nu_2 = \ddot{u} / A$. Le grandezze adimensionali sono pertanto 6, di cui 5 indipendenti:

$$H = \mathfrak{F}(\xi, \tau, \zeta, \eta, \theta) \quad (2)$$

Il modello numerico

Le analisi numeriche sono state condotte con il codice alle differenze finite FLAC. L'intero modello, di dimensioni 300 x 500 m, comprende una cavità circolare di raggio $a=5$ m ed è discretizzato uniformemente con zone quadrangolari di lato $\Delta l = 0.25$ m, capaci di trasmettere armoniche fino alla lunghezza d'onda limite $\lambda_{\min} = 8 \cdot \Delta l = 2.0$ m (Kuhlemeyer e Lysmer, 1973), corrispondente ad una frequenza normalizzata massima di $\eta_{\max} = 2a/\lambda_{\min} = 5.0$. Le proprietà fisiche e dinamiche del mezzo elastico sono $\rho=1000$ kg/m³, $V_S=100$ m/s e $\nu = 0.3$.

Mentre la variabilità dell'ascissa normalizzata ζ e del tempo normalizzato τ è implicitamente inclusa nel modello numerico, l'angolo di incidenza e la profondità normalizzata sono stati fatti variare tra i valori: $\theta = 0, 15^\circ, 30^\circ$ e $\zeta = 1.5, 2.0, 4.0, 8.0$. Dovendo sviluppare le analisi sia nel caso di onde SV incidenti che nel caso di onde P incidenti, si contano nel complesso $2 \times 3 \times 4 = 24$ differenti combinazioni da analizzare.

Per assicurare la necessaria estensione del campo delle frequenze normalizzate η , come moto incidente sono state utilizzate due onde Ricker (Fig. 2) aventi spettri di Fourier centrati rispettivamente sugli intervalli $\eta = 0.05-0.4$ e $\eta = 0.4-2.0$ (Fig. 3). Per ogni combinazione, i risultati ottenuti con i due input sono stati fusi in un unico diagramma, coprendo complessivamente l'intero intervallo $\eta = 0.05-2.0$.

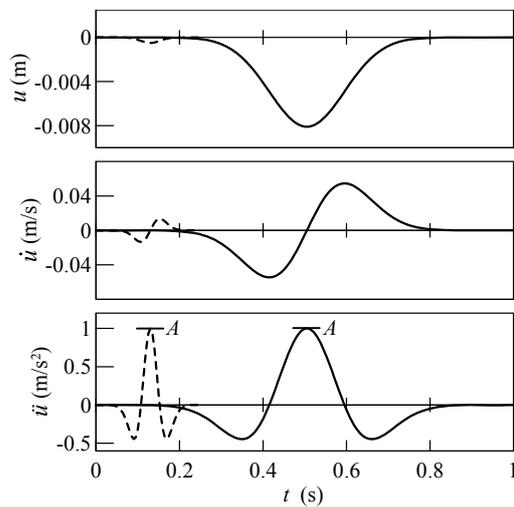


Figura 2. Storie temporali di accelerazione, velocità e spostamenti delle due onde Ricker utilizzate come input.

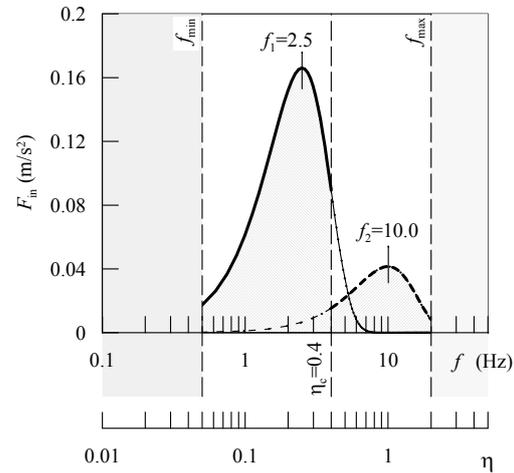


Figura 3. Spettri di Fourier delle onde di Ricker utilizzate come input.

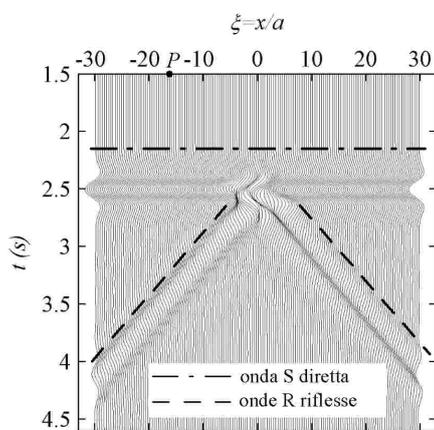


Figura 4. Sismogramma sintetico della componente orizzontale dell'accelerazione (analisi con $\theta=0, \zeta=1.5, \eta=0.25$, onda S).

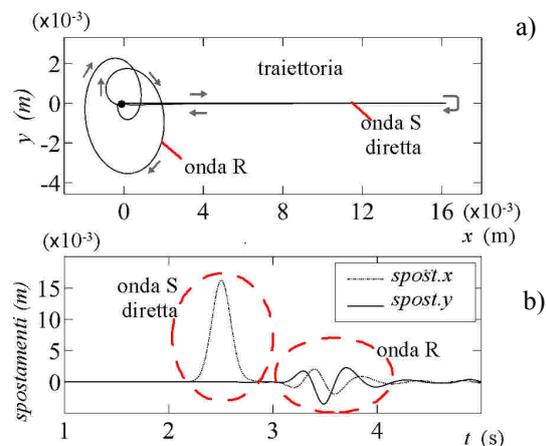


Figura 5. Traiettoria del punto P della superficie (a) e storia temporali delle componenti del moto (b).

Risultati

Il sismogramma ottenuto affiancando le storie temporali della componente orizzontale del moto, calcolate sulla superficie libera del modello, aiuta ad individuare i principali fenomeni prodotti nell'incidenza verticale sulla cavità di un fronte d'onda di tipo S, per cavità disposta alla minima profondità considerata ($\zeta = 1.5$, Fig. 4). La prima perturbazione osservabile, sincrona sull'intera superficie, corrisponde all'incidenza dell'onda S diretta. Sopra la cavità vengono inoltre generate due onde superficiali che si propagano in direzione opposta; la loro caratterizzazione come onde di Rayleigh è confermata dalla velocità con la quale si propagano (calcolata sul sismogramma come pendenza delle corrispondenti linee spazio-tempo), dallo sfasamento di 90° delle componenti orizzontale e verticale, e dalla traiettoria ellittica retrograda percorsa da un punto sufficientemente lontano dalla cavità (Fig. 5). Nelle immediate vicinanze della cavità, l'interferenza costruttiva tra le due perturbazioni conduce alla massima amplificazione del moto.

Per meglio valutare l'effetto proprio della presenza della cavità i risultati ottenuti dalle analisi numeriche in ciascun punto della superficie, in termini di spettro di Fourier $F_{out}(\zeta, \eta)$, sono stati normalizzati non rispetto al moto incidente, ma rispetto alla risposta in condizioni di campo libero $F_{ff}(\eta)$, per lo stesso angolo di incidenza del fronte d'onda. I rapporti di amplificazione così ottenuti per ciascuna delle due componenti del moto, H_x e H_y , sono rappresentabili mediante diagrammi a linee di livello in funzione della distanza dalla cavità ζ e della frequenza η . La risposta in condizioni di *free-field* è proporzionale al moto incidente secondo la relazione $F_{ff}(\eta) = \alpha \cdot F_{in}(\eta)$, con un coefficiente $\alpha(\theta)$ analiticamente ricavato secondo le indicazioni di Aki e Richards (2002).

La figura 6a, ad esempio, rappresenta il rapporto di amplificazione della componente orizzontale nel caso di incidenza verticale di onda S su cavità alla minima profondità normalizzata. Sono evidenti due zone di massima amplificazione delle armoniche di bassa frequenza relativa ($H_x > 1.5$ per $0.15 < \eta < 0.25$) in corrispondenza delle zone al di sopra dei fianchi della cavità, mentre alle frequenze più elevate si ottiene una generale attenuazione al di sopra della cavità con limitati picchi di amplificazione a maggiori distanze da essa.

All'aumentare della profondità della cavità (Fig. 6b, c, d) gli effetti amplificanti o deamplificanti tendono progressivamente ad attenuarsi, sebbene l'attenuazione delle alte frequenze risulta ancora percepibile anche per $\zeta > 4.0$.

Il rapporto di amplificazione della componente verticale del moto per onda di tipo P incidente verticalmente (Fig. 7), mostra come l'area al di sopra del tetto della cavità sia soggetta ad importanti fenomeni di risonanza, con un'amplificazione che, per la condizione di massima superficialità della cavità, supera il valore di $H_y = 3$ (Fig. 7a), ma che si attenua rapidamente all'aumentare della profondità. Per $\zeta = 4.0$ le condizioni di campo libero possono già considerarsi raggiunte a fini pratici (Fig. 7c).

L'effetto dell'inclinazione del fronte d'onda è illustrato riportando, per ciascuna componente, i risultati delle analisi ottenute con tre diversi angoli di incidenza e per una profondità normalizzata fissata al valore minimo $\zeta = 1.5$.

L'amplificazione della componente orizzontale (Fig. 8) rende evidente come l'inclinazione accentui la fitta alternanza di zone ad interferenza costruttiva con quelle ad interferenza distruttiva. Per il massimo angolo di inclinazione, $\theta = 30^\circ$, si registra un generale effetto di amplificazione per le armoniche a frequenza normalizzata più bassa, sul lato della superficie "illuminato" dal fronte, e per le frequenze più elevate sul lato della superficie posto in ombra dalla cavità. L'effetto dell'inclinazione sulla componente verticale (Fig. 9) risulta invece quasi del tutto assente, come evidenziato dalla persistenza del picco di risonanza al di sopra del tetto della cavità, sia in termini di posizione che di frequenze interessate, indipendentemente dall'angolo di incidenza del fronte.

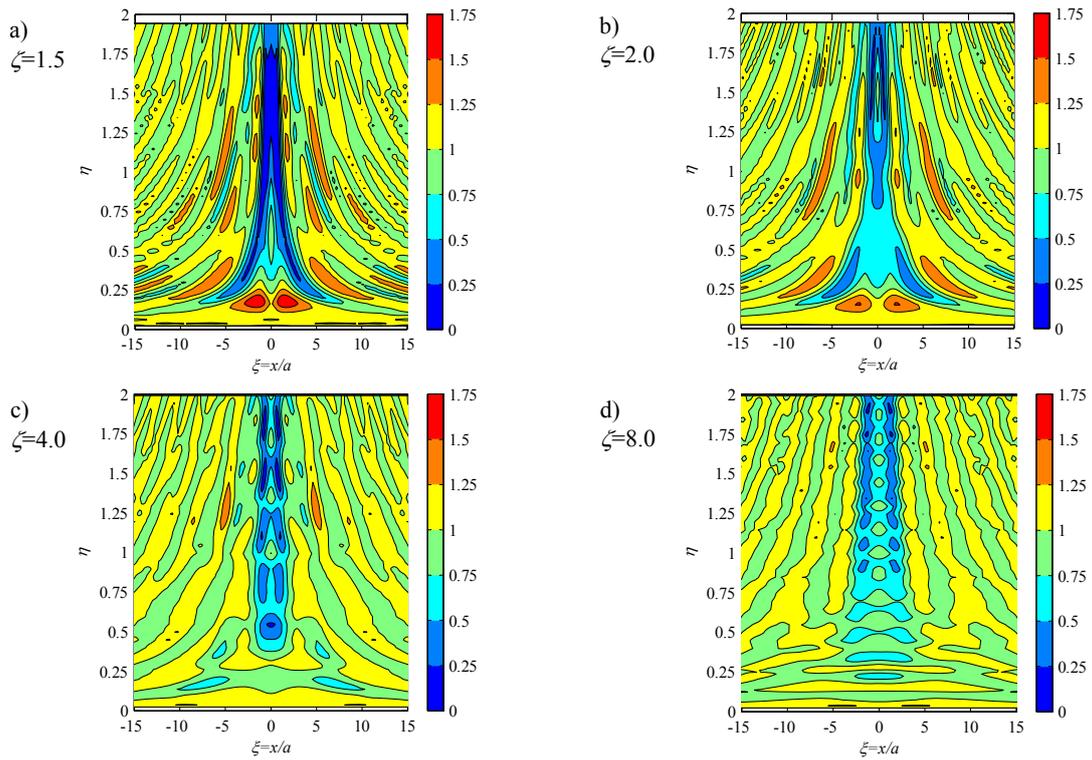


Figura 6. Diagrammi a linee di livello dell'amplificazione della componente orizzontale H_x per incidenza verticale di un'onda S, al variare della profondità della cavità.

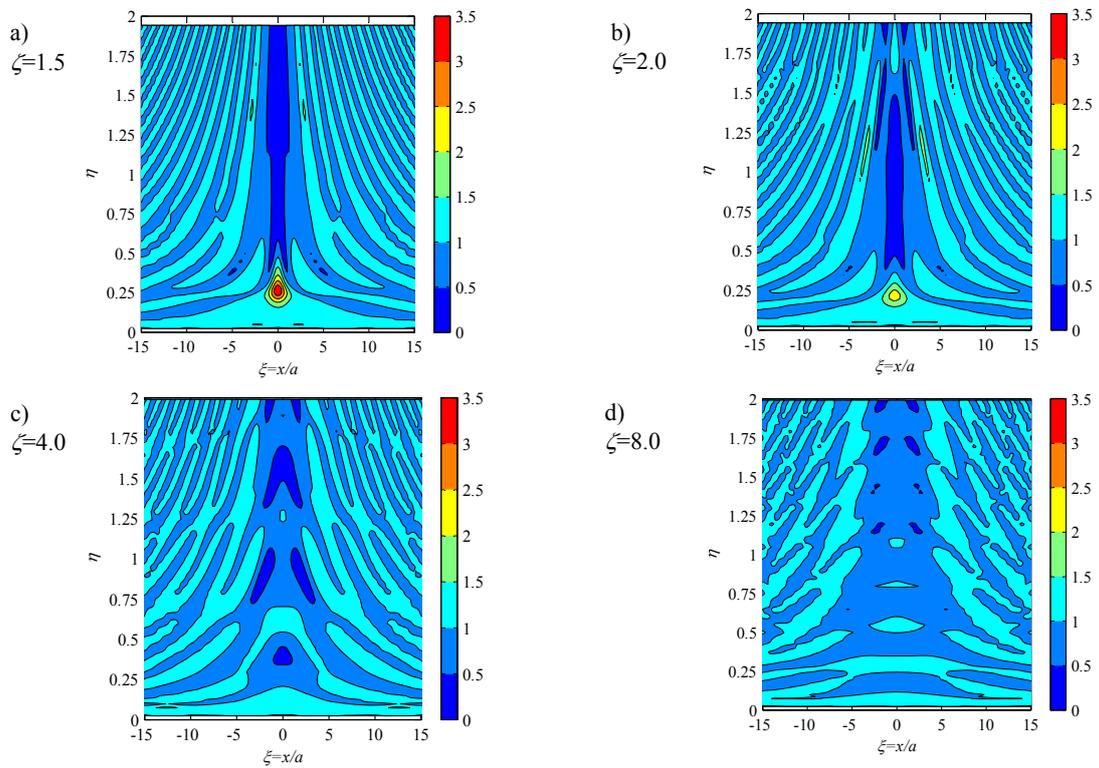


Figura 7. Diagrammi a linee di livello dell'amplificazione della componente verticale H_y per incidenza verticale di un'onda P, al variare della profondità della cavità.

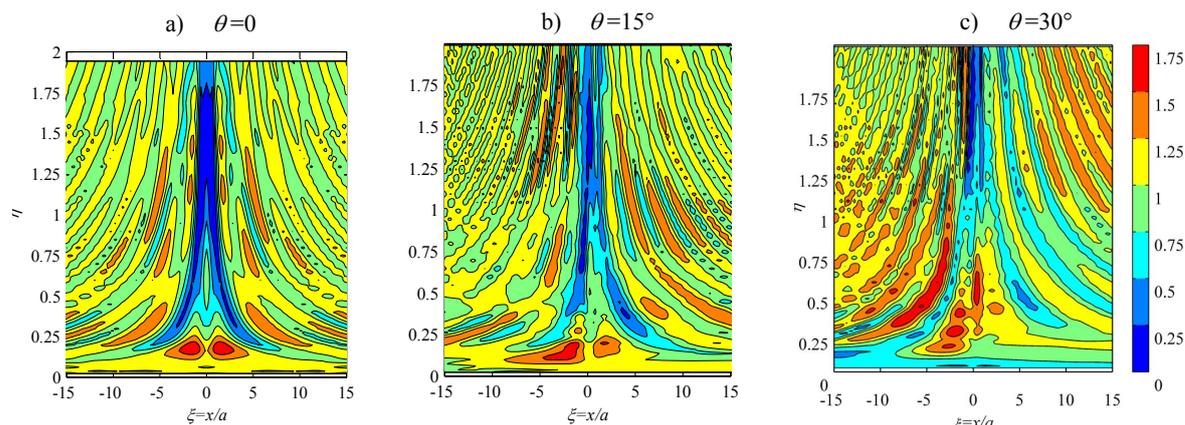


Figura 8. Diagrammi a linee di livello dell'amplificazione della componente orizzontale H_x per la minima profondità della cavità ($\zeta=1.5$) e tre diversi angoli di incidenza di un'onda S .

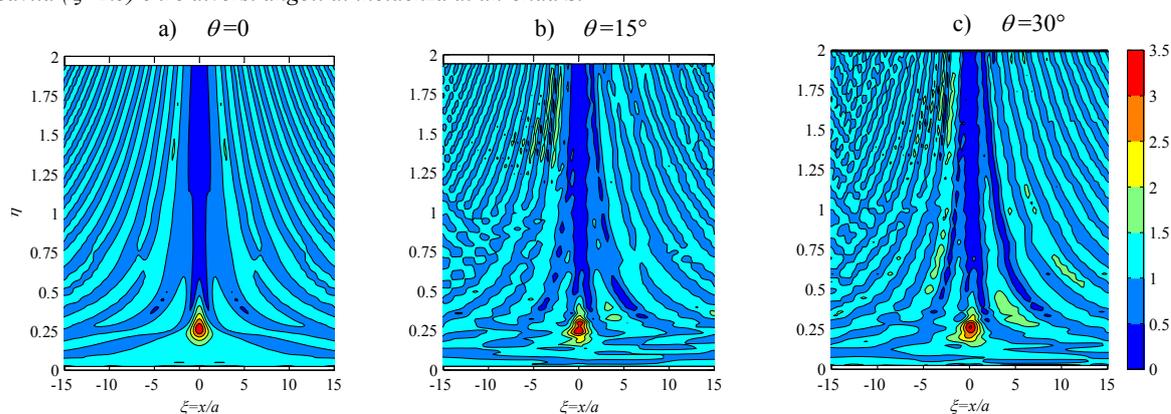


Figura 9. Diagrammi a linee di livello dell'amplificazione della componente verticale H_y per la minima profondità della cavità ($\zeta=1.5$) e tre diversi angoli di incidenza di un'onda P .

Bibliografia

- Aki, K. e Richards, P.G. (2002). Quantitative Seismology, Univ. Science Books, Sausalito, CA-US.
- Davis, C. A., Lee, V. W. and Bardet, V. W. (2001). Transverse response of underground cavities and pipes to incident SV waves. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 30:383-410.
- Itasca Consulting Group (2011). *FLAC User's manuals*. Minneapolis.
- Kuhlemeyer, R.L. e Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCEE*, Vol. 99, No. 5, pp. 421-427.
- Landolfi, L., Silvestri, F. e Costanzo, A. (2011). Effetti di cavità nel sottosuolo sulla risposta sismica locale: uno studio pilota ispirato al caso di Castelnuovo. *Proc. ANIDIS*, Bari 18-22/09/2011.
- Lee, V.W. (1977). On deformations near circular underground cavity subjected to incident plane SH waves. *Proc. Symp. of Applications of Computer Methods in Eng., USC, Los Angeles*, 1977:951-961.
- Lee, V.W. e Trifunac, M.D. (1979). Response of tunnels to incident SH-waves. *Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE)*, 105(4):643-659.
- Lee, V.W. e Karl, J. (1992). Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(8):445-456.
- Lee, V.W. and Karl, J. (1993). On deformation near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves. *European Earthquake Engineering*, 6(1):29-36.
- Sanò, T. (2011). Risposta sismica locale in presenza di cavità sotterranee. *Ingegneria sismica*. Anno XXVIII 2:25-34.
- Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R. e Sanchez-Sesma, F. J. (2009). Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation. *Earth. Eng. & Struc. Dyn.*, 38:1441-1460.
- Wong, K.C., Shah, A.H. e Datta, S.K. (1985). Diffraction of elastic waves in a half-space. II. Analytical and numerical solutions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(1):69-92.